

## **Eutrophierung der Schlei - Vergangenheit und Gegenwart -**

**Klaus Gocke und Gerhard Rheinheimer**

Institut für Meereskunde an der Universität Kiel  
Düsternbrooker Weg 20, 24105 Kiel

### **Einleitung**

Während für die Darß-Zingster Bodden eine jahrzehntelange, praktisch kontinuierliche Meßreihe hydrographischer, chemischer und biologischer Variablen vorliegt, wurden bisher in der Schlei nur einige kürzere Untersuchungen durchgeführt. Diese erstreckten sich über jeweils ein oder höchstens einige Jahre. Besonders zu nennen sind hier die umfassenden Arbeiten unter Federführung von RHEINHEIMER aus den Jahren 1966-1967, die zusammenhängend in einem Heft der Kieler Meeresforschungen dargestellt wurden (Kieler Meeresforsch. Bd. 26, 1970). Der Jahresgang der Primärproduktion wurde 1972 von SCHIEMANN (1974) gemessen. In den Jahren 1981-1983 erfolgten die Untersuchungen für die große Studie von RIPL (1986), die die Grundlage eines Gutachtens über den Eutrophierungsgrad der Schlei und über mögliche Maßnahmen hinsichtlich einer Verbesserung ihres Zustandes bildete.

Die eigenen Untersuchungen, auf die in der vorliegenden Veröffentlichung eingegangen werden soll, erstreckten sich über die Jahre 1991-1993 (1990 wurde bereits mit Vorarbeiten begonnen; GOCKE und RHEINHEIMER, 1991). Eine der wesentlichen Aufgaben der Arbeit war es, den gegenwärtigen Zustand der Schlei mit dem vor einem Vierteljahrhundert, also der Zeit von RHEINHEIMERS Studien, zu vergleichen. Zur besseren Vergleichbarkeit stimmten die Methoden zur Messung derjenigen Variablen, die hier behandelt werden, weitgehend mit den von RHEINHEIMER verwendeten überein. Außerdem wurden die gleichen Stationen angelaufen, und die Profilmfahrten fanden wie damals in monatlichen Abständen statt.

### **Beschreibung der Schlei**

Eine eingehende Beschreibung hinsichtlich ihrer Hydrographie und Chemie (NELLEN, 1970) sowie der landschaftlich-ökologischen Faktoren (KÖNIG, 1970) findet sich in dem bereits erwähnten Heft der Kieler Meeresforschungen aus dem Jahre 1970 und in dem Gutachten von RIPL (1986). An dieser Stelle soll deshalb nur eine kurze Darstellung gegeben werden.

Die Schlei ist eine der vier Förden der Ostseeküste Schleswig-Holsteins. Sie erstreckt sich von ihrer "Mündung" bei Schleimünde ca. 40 km nach Südosten. Über weite Strecken ähnelt sie eher einem Flußlauf als einer Meeresbucht. Nur an ihrem landseitigen Ende bei Schleswig finden sich zwei größere, seenartige Erweiterungen (Abb. 1). Die Fläche der Schlei beträgt 54 km<sup>2</sup> und ihr Einzugsgebiet (ohne die Wasserfläche der Schlei) beläuft sich auf 666 km<sup>2</sup>. Die mittlere Tiefe ist nur 2.5-3.0 m und das Volumen ca.  $180 \times 10^6 \text{ m}^3$ . Der Salzgehalt lag im Untersuchungszeitraum an ihrer "Mündung" zwischen 11.0-19.6 ‰ und in der inneren Schlei zwischen 3.5-8.8 ‰.

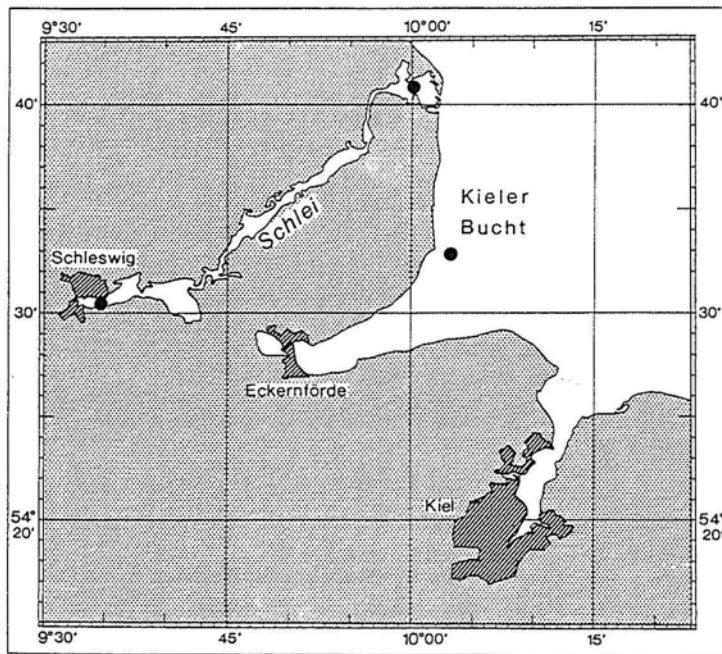


Abb. 1: Lage der 3 Stationen "Boknis Eck" in der Kieler Bucht, "Schleimünde" am Eingang der Schlei und "Schleswig" in der inneren Schlei.

Durch die Lage der Schlei im relativ nährstoffreichen ostschleswigschen Hügelland und ihre hydrographische Situation, speziell die niedrige mittlere Tiefe und die langen Küstenlinien im Vergleich zum geringen Wasservolumen, ist es naheliegend, daß dieses Gewässer bereits von Natur aus einen eutrophen Charakter besitzt. Hinzu kommen die anthropogen bedingten Einflüsse besonders in diesem Jahrhundert. Beides führt dazu, daß die Schlei eine sehr hohe Primärproduktivität aufweist.

Dies soll durch die Gegenüberstellung der Primärproduktivitäten der Schlei und eines oligotrophen Meeresgebietes, und zwar dem Golf von Cádiz (westl. der Straße von Gibraltar), verdeutlicht werden (Abb. 2). Während sich die produktive Schicht in diesem Golf bis in etwa 70 m Wassertiefe erstreckte, betrug ihre Dicke in der inneren Schlei nur knapp 1 m. Die maximalen Produktionswerte pro Volumeneinheit, die in der Schlei direkt an der Oberfläche gemessen wurden, übertrafen diejenigen im Golf von Cádiz, die dort in ca. 40 m Wassertiefe lagen, um das mehr als 500-fache. Natürlich ist der Unterschied der Produktion auf Flächenbasis infolge der geringen Mächtigkeit der produktiven Schicht in der Schlei erheblich geringer. Hier übertraf die Schlei den Golf von Cádiz um etwas mehr als das 3-fache. Die hohen Konzentrationen des Planktons in der Schlei sowie die bei ihrer geringen Tiefe schnelle Resuspendierung der obersten Sedimentschichten durch windinduzierte Strömungen führen zu einer erheblichen Trübung des Wassers sowie zur Schaumbildung und damit zu ästhetischen Problemen hinsichtlich der Bademöglichkeiten, um nur eine der unmittelbaren Folgen, hier für den Tourismus, zu nennen.

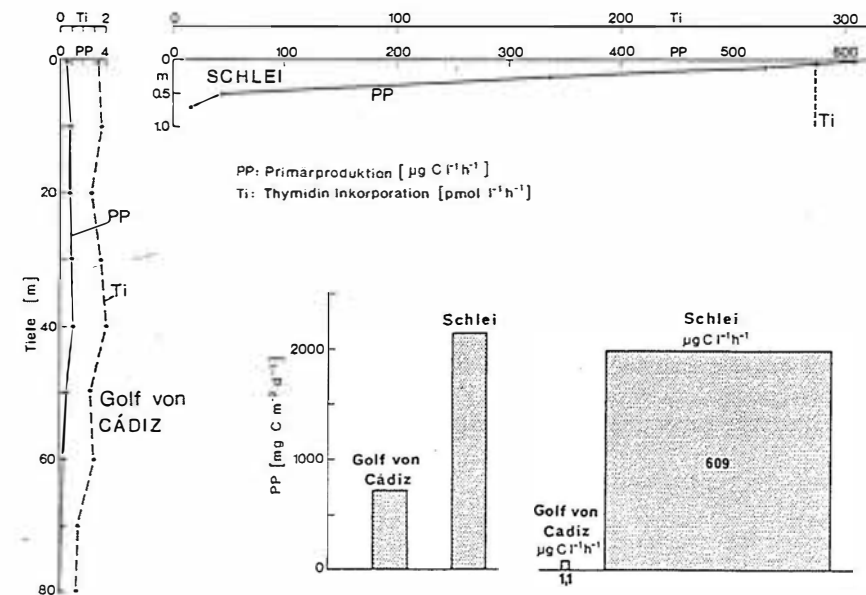


Abb. 2: Vergleich der Primärproduktion des Golfs von Cádiz (5.5.1991) und der inneren Schlei (11.6.1991). Zur Beachtung: Im Vergleich zum Golf sind für die Schlei der Tiefenmaßstab 10-fach überhöht und der Maßstab der Primärproduktion 10-fach verkleinert dargestellt.

Zusätzlich zu dieser Gegenüberstellung eines hoch eutrophen und eines oligotrophen Gewässers sollen die Auf- und Abbauraten der organischen Substanz auf zwei Stationen in der Schlei und auf einer Referenzstation in der Kieler Bucht miteinander verglichen werden. Für diesen Vergleich sind aus einer Reihe von Stationen in der Schlei die Station "Innere Schlei" in der Kleinen Breite bei Schleswig und das "Mündungsgebiet" bei Schleimünde ausgewählt worden. Als Referenzstation dient die Station "Boknis Eck" am Ausgang der Eckernförder Bucht (Abb. 1). Die Primärproduktion belief sich auf über 600 g C m<sup>-2</sup> (innere Schlei), knapp 200 g C m<sup>-2</sup> (Schleimünde) und auf etwa 150 g m<sup>-2</sup> (Boknis Eck) für das Jahr 1992. Auf den Stationen in der Schlei (für die Station Boknis Eck können die Berechnungen nicht gemacht werden) wurden ca. 80-90 % der Primärproduktion in der Wassersäule, die an beiden Stellen eine Tiefe von 4,5 m hatte, abgebaut. Dieser Abbau gilt für die mitten im Fahrwasser gelegenen, relativ tiefen Stellen. Berechnet man die Werte für das größere Umfeld der beiden Stationen, das jeweils eine mittlere Tiefe von 2,5 m hat, so werden nur ca. 50 % der Primärproduktion in der Wassersäule abgebaut. Die andere Hälfte der partikulären organischen Substanz sedimentiert und wird zum Teil im Sediment abgebaut, zum Teil aber auch als permanentes Sediment festgelegt. Diese große Menge an sedimentierender Substanz hat einen erheblichen Jahreszuwachs an Sediment zur Folge, der etwa 8-10 mm betragen soll. Bis vor ca. 100 Jahren betrug der jährliche Zuwachs an Sediment dagegen nur ca. 1-2 mm (RIPL, 1986).

Der Zustand der Schlei gegen Ende des letzten Jahrhunderts kann aus einigen historischen Daten rekonstruiert werden. Für den Zeitraum 1873 - 1893 legte die Preußische Kommission zur wissenschaftlichen Erforschung der deutschen Meere einen Bericht vor, in dem auf eine reiche Unterwasservegetation in der Schlei hingewiesen wurde. Dieser Zustand wurde auch ca. 50 Jahre später von REMANE (1937) noch vorgefunden. REMANE wies aber auch schon auf ausgedehnte Faulschlammgebiete hin, die in ihrer Flächenausdehnung seitdem noch erheblich zugenommen haben. Die Unterwasservegetation ist gegenwärtig vollständig verschwunden. Der rasante Zuwachs an Faulschlamm und das Verschwinden der Unterwasservegetation ist sicherlich weitgehend eine Folge der menschlichen Eingriffe in die Schlei selbst und in ihr Einzugsgebiet.

#### Betrachtung der letzten 25 Jahre

Wenn wir uns nun den Daten von RHEINHEIMER (1970 a, b, c) zuwenden und sie mit den Befunden der Untersuchungen von 1991-1993 vergleichen, so soll erst einmal voraus geschickt werden, daß ein derartiger Vergleich stets Probleme in sich birgt. So könnte sich in diesem Vierteljahrhundert durchaus eine deutlich positive oder negative Veränderung der Gewässergüte der Schlei eingestellt haben, ohne daß der Vergleich der damaligen mit den heutigen Ergebnissen das widerspiegelt. Dieses würde dann der Fall sein, wenn die Untersuchungen in "Ausnahme"-Jahren stattgefunden hätten. Im Extremfall könnte das sogar zu einer völlig falschen Einschätzung der Situation führen. Ein zweiter Punkt, der in diesem Zusammenhang zu nennen ist, berührt das Problem der Vergleichbarkeit der Methoden.

Hier wurde jedoch großer Wert darauf gelegt, die Methoden weitgehend beizubehalten.

Bei der Betrachtung des Jahresganges der PO<sub>4</sub>-Konzentration (Abb. 3) stechen sofort die hohen Werte auf der Station Schleswig (innere Schlei) ins Auge (Maximalwert: 13.6 µmol l<sup>-1</sup>).

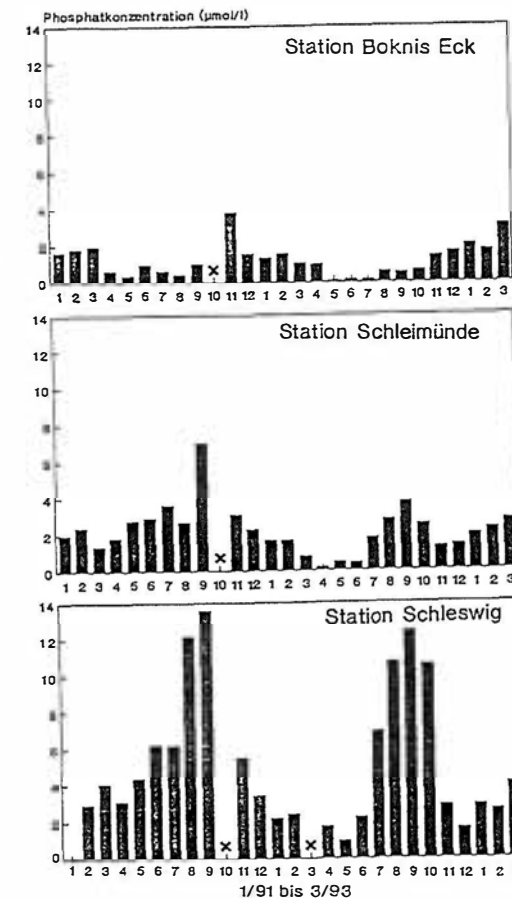


Abb. 3: Jahresgänge der Orthophosphat-Konzentration der Stationen "Boknis Eck", "Schleimünde" und "Schleswig" (x = fehlende Daten).

Sie übertreffen damit diejenigen der Station Schleimünde am Ausgang der Schlei deutlich (Maximalwert:  $7.0 \mu\text{mol l}^{-1}$ ), die selbst wiederum erheblich höher waren als die der Station Boknis Eck in der Kieler Bucht (Maximalwert:  $3.8 \mu\text{mol l}^{-1}$ ). Im Jahre 1967 wurden in der inneren Schlei maximale Phosphat-Konzentrationen von etwas über 17 und auf der Station Schleimünde von  $5 \mu\text{mol l}^{-1}$  gemessen, also Werte, die gut mit unserer Beobachtung in der inneren Schlei übereinstimmen (RHEINHEIMER, 1970 a). Diese gute Übereinstimmung gilt besonders für die innere Schlei, weniger dagegen für Schleimünde, da hier durch starke Ein- oder Ausstromereignisse leichter extreme Situationen hinsichtlich der Nährstoffkonzentrationen zu erwarten sind (Abb. 4).

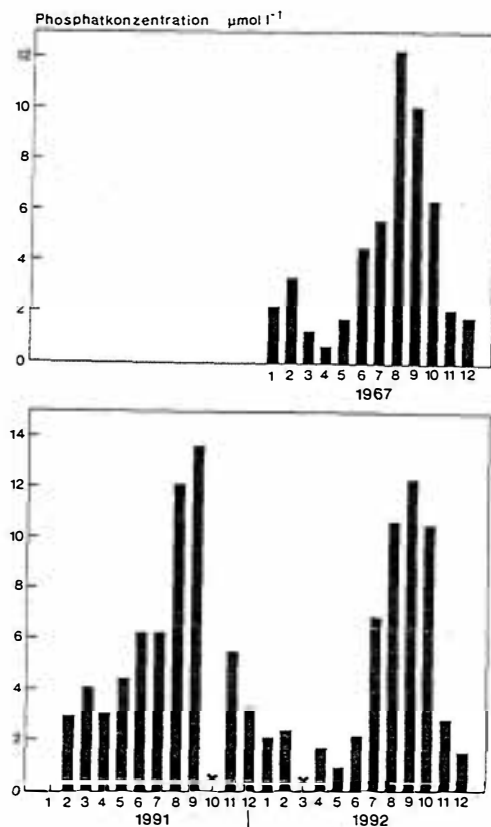


Abb. 4: Jahresgänge der Orthophosphat-Konzentration in den Jahren 1967 und 1991-1992 auf der Station "Schleswig" (x : fehlende Daten).

Die in Abb. 3 dargestellten Jahresgänge der  $\text{PO}_4$ -Konzentrationen zeigen, daß die Maxima und Minima der beiden Schlei-Stationen zeitlich gut übereinstimmen, während sie auf der Station Boknis Eck in der Kieler Bucht deutlich versetzt sind. In der Kieler Bucht liegt das "normale" Bild vor, also hohe Konzentrationen im Winter und niedrige während der Vegetationsphase.

Der Befund, daß in der Schlei die maximale Orthophosphat-Konzentration im Spätsommer auftritt, trifft auch für früher durchgeführte Messungen zu, so für das Jahr 1960 (NELLEN, 1970), für 1967 (RHEINHEIMER, 1970 a) und für 1981-1983 (RIPL, 1986). Dieses Phänomen ist dadurch bedingt, daß im Sommer auch die oberste Schicht des Sedimentes anoxisch wird. Diese Schicht ist während des übrigen Jahres oxisch, da zumindest im Wasser der Schlei, begünstigt durch die geringe Tiefe des Gewässers, bis in die unmittelbare Kontaktzone genügend Sauerstoff vorhanden ist. Erst bei den relativ hohen Temperaturen im Spätsommer sind die Zehrungsvorgänge im Sediment der Schlei so intensiv, daß die Sauerstoffnachlieferung nicht mehr ausreicht, um den oxidativen Status der oberflächennahen Schicht aufrechtzuerhalten. Damit erlischt die Sperrwirkung dieser Schicht gegenüber dem  $\text{PO}_4$ , so daß seiner Rückführung in das Wasser nichts mehr entgegensteht. Die Schlei verhält sich also ähnlich wie ein eutropher See zur Zeit der Sommerstagnation, allerdings mit dem Unterschied, daß im See das Phosphat im Hypolimnion "gefangen" bleibt.

Die hohen Nährstoffkonzentrationen in der Schlei führen zu einer hohen Primärproduktivität, deren Voraussetzung wiederum eine hohe Chlorophyll-Konzentration ist. In Abb. 5 ist der Jahresgang des Chlorophyll-a-Gehaltes für die Stationen "Boknis Eck", "Schleimünde" und "Schleswig" dargestellt. Hier ist das starke Übergewicht in der inneren Schlei noch mehr ins Auge fallend als beim Phosphat. Die höchsten Werte betrugen  $176 \mu\text{g l}^{-1}$ , während sie bei Boknis Eck weit unter  $10 \mu\text{g l}^{-1}$  lagen. Von LENZ (1970) ist der Jahresgang des Chlorophylls für den Zeitraum März 1966 bis März 1967 untersucht worden. In Abb. 6 sind seine Werte denen des Zeitraums 1991-1993 gegenübergestellt. Danach sieht es so aus, als ob die Chl-a-Konzentrationen in der inneren Schlei zurückgegangen seien. Möglicherweise sind die von LENZ beobachteten drei Peaks aber auch Ausnahmen, denn es fällt auf, daß die restlichen Werte der Vegetationsperiode relativ gleichförmig sind und zwischen ca.  $170$ - $200 \mu\text{g l}^{-1}$  lagen. Eine ähnliche Gleichförmigkeit wurde für 1991 mit Werten um  $170$ - $180 \mu\text{g l}^{-1}$  beobachtet (Abb. 6). Trifft diese Hypothese zu, so hat sich bezüglich der Chlorophyll-Konzentration nur wenig geändert. Sind jedoch die Peaks eine typische Erscheinung der ein Vierteljahrhundert zurückliegenden Untersuchung, so waren die damaligen Konzentrationen etwas höher, als sie in den letzten Jahren beobachtet wurden. Diese Differenz verringert sich allerdings wieder etwas, denn bei den damaligen Messungen wurden die Summe von Chl-a und Phaeophytin angegeben. Nach eigenen Untersuchungen und nach mündlichen Mitteilungen von LENZ können in der Schlei die Phaeophytin-Mengen bis zu etwa 30 % der Chlorophyll-Konzentration betragen.

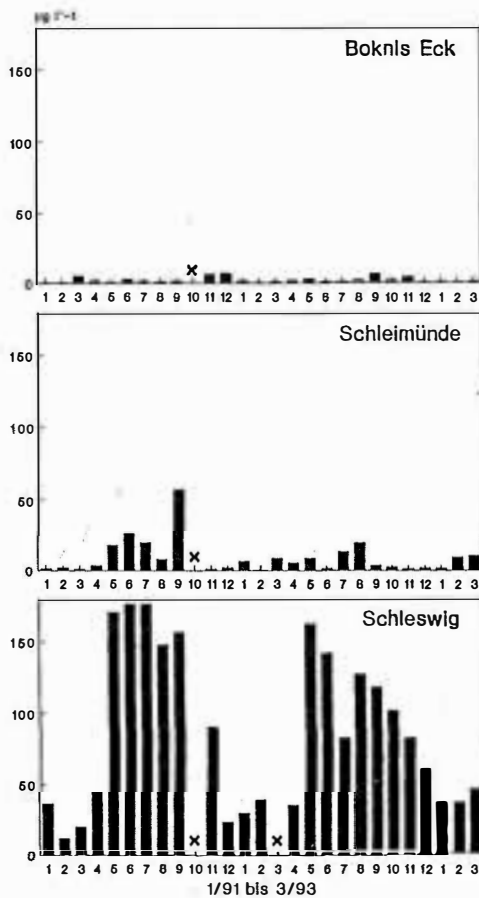


Abb. 5 (links) : Jahresgänge der Chlorophyll a-Konzentrationen an den Stationen "Boknis Eck", "Schleimünde" und "Schleswig" (x : fehlende Daten).

Abb. 6 (oben) : Jahresgänge der Chlorophyll a-Konzentrationen der Jahre 1966/67 und 1991-1993 an der Station "Schleswig". Für 1966/67 ist die Summe von Chl-a und Phaeophytin und für 1991-1993 der Wert für Chl-a allein dargestellt. (x : fehlende Daten).

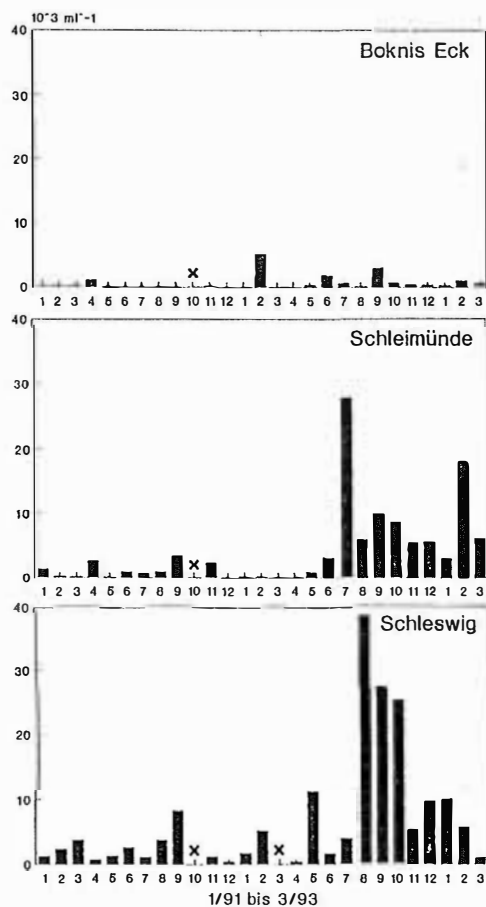
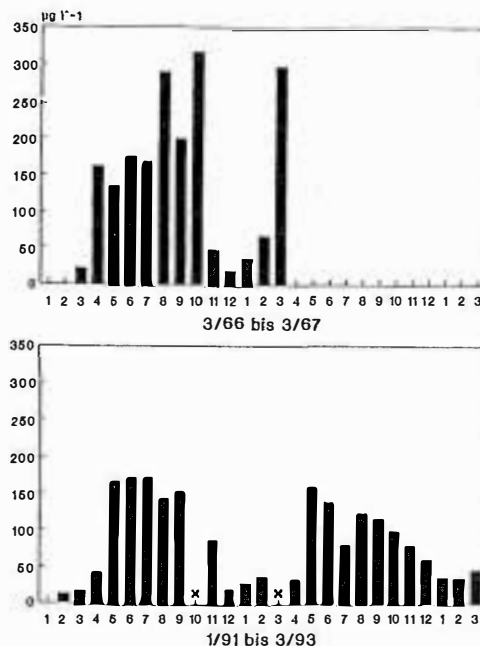
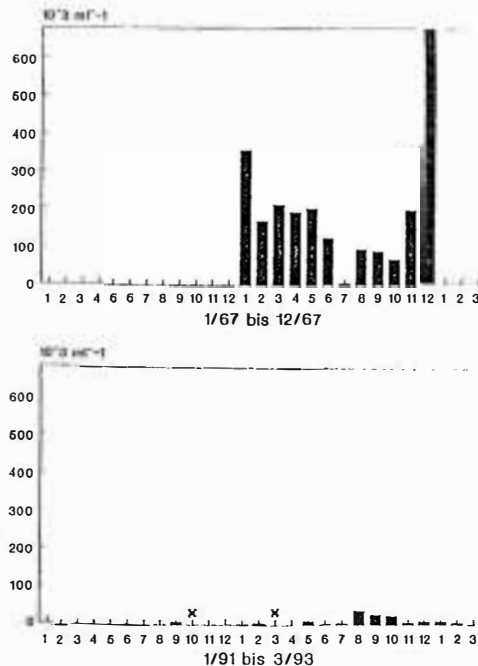


Abb. 7 (links) : Jahresgänge der Saprophytenzahl der Stationen "Boknis Eck", "Schleimünde" und "Schleswig" (x : fehlende Daten).

Abb. 8 (oben) : Jahresgänge der Saprophytenzahl der Jahre 1967 und 1991-1993 an der Station "Schleswig" (x : fehlende Daten).



Wenn wir nun von den chemischen und planktologischen Daten zu den mikrobiologischen übergehen und zuerst die Zahl der Saprophyten auf einem Brackwasser-Medium betrachten, so sehen wir auch hier wieder die erheblich höheren Werte der inneren Schlei gegenüber der Kieler Bucht (Boknis Eck).

Die Station "Schleimünde" fällt dagegen weniger deutlich hinter die Station "Schleswig" zurück (Abb. 7). Eigenartig ist hier, daß die beiden untersuchten kompletten Jahre völlig unterschiedliche Saprophytenzahlen erbrachten - ein Befund, der bei den anderen Parametern nicht auftrat. Meteorologische Faktoren dürften eine derartig drastische Veränderung nicht bewirkt haben, denn obwohl das Jahr 1992 sonniger und wärmer war als 1991, hielten sich die Unterschiede in Grenzen.

Aber selbst wenn wir das Jahr 1992 mit den gegenüber dem Vorjahr deutlich höheren Saprophytenzahlen als das typischere betrachten, so waren die hier gefundenen Zahlen immer noch erheblich geringer als 1967 (Abb. 8). RHEINHEIMER (1970 b) ermittelte als Maximalwert 683.000 Saprophyten in 1 ml Wasser. Dieser hohe Wert wurde im Dezember beobachtet. Im Januar des gleichen Jahres war die Zahl zwar erheblich niedriger, aber auch hier wurden noch 360.000 Keime  $\text{ml}^{-1}$  gefunden. Die niedrigsten Werte lagen damals im Sommer und Frühherbst.

Genau dieses war jedoch der Zeitraum, in dem 1992 die höchsten Saprophytenzahlen (Maximalwert: 38.500  $\text{ml}^{-1}$ ) auftraten. Für 1967 betrug der Jahresmittelwert 208.500, während im Jahre 1992 der Mittelwert nur bei 11.900 Saprophyten  $\text{ml}^{-1}$  lag.

Ähnlich große Unterschiede fanden sich bezüglich der Gesamtcoliformenzahl in der inneren Schlei (Abb. 9). Der Jahresmittelwert lag im Jahre 1967 bei 5.300 coliformen Bakterien in 100 ml Wasser (RHEINHEIMER, 1970 b). Ein Vierteljahrhundert später waren im Mittel 1.500 Coliforme in 100 ml vorhanden. Bei beiden Untersuchungen wurde der Dreifarbenagar nach GASSNER (s. RHEINHEIMER, 1965 b) verwendet. Die höchsten Werte wurden in beiden Jahren im Sommer beobachtet.

Bei der Interpretation der Ergebnisse muß klar zwischen chemischen und planktologischen Variablen auf der einen Seite und mikrobiologischen auf der anderen Seite unterschieden werden. Es konnte gezeigt werden - immer unter der Voraussetzung, daß die Jahre 1966/67 und 1991-1993 keine Ausnahmefälle darstellen - daß die Konzentration von Orthophosphat, die Menge an Chlorophyll und die Primärproduktivität im letzten Vierteljahrhundert keine größeren Änderungen durchgemacht haben.

Im Einzugsgebiet der Schlei wohnten nach Angaben des Statistischen Landesamtes von Schleswig-Holstein im Jahre 1987 knapp 80.000 Einwohner. Der Anschlußgrad der Bevölkerung an eine öffentliche Kläranlage betrug 72,3 %. Die Abwässer des restlichen Bevölkerungsteiles wurden über Hauskläranlagen gereinigt.

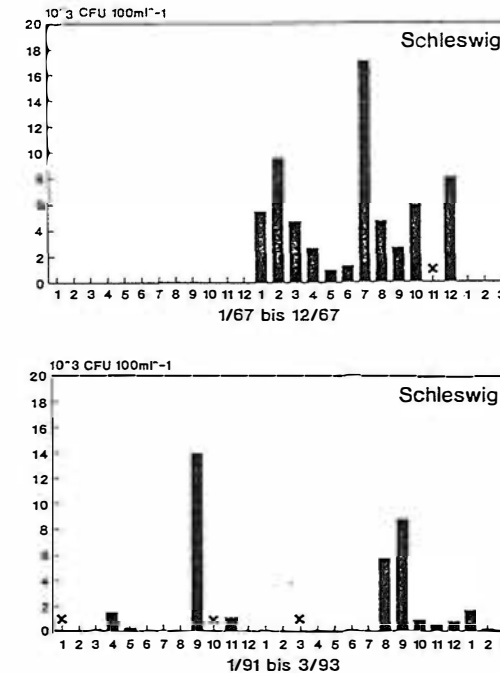


Abb. 9 : Jahresgänge der Zahl der gesamtcoliformen Bakterien in den Jahren 1967 und 1991-1993 an der Station "Schleswig" (x : fehlende Daten).

Im Jahre 1967 lebten in diesem Gebiet etwa gleich viele Personen. Damals war der Anschluß an öffentliche Kläranlagen erheblich geringer. Nach Angaben von KÖNIG (1970) gab es zu dieser Zeit noch keine vollbefriedigenden Reinigungsanlagen. So war z. B. die Kläranlage von Schleswig wegen der neu hinzugekommenen Industriebetriebe völlig überlastet. Ohne hier genaue Zahlen angeben zu können, läßt sich doch zumindest mit großer Wahrscheinlichkeit sagen, daß vor 25 Jahren mehr organische Substanz und auch mehr anorganische Nährstoffe über die Abwässer in die Schlei gelangt sind als heute. Mit ständig steigender Effizienz der Abwasserreinigung dürfte hier jedoch inzwischen ein deutlicher Rückgang - selbst bei höherem Abwasseranfall - eingesetzt haben, so daß inzwischen der Nährsalzeintrag durch Abwasser gering ist im Vergleich zu diffusem Eintrag aus dem landwirtschaftlich intensiv genutzten Einzugsgebiet. Für die Nährstoffbilanz der Schlei lassen die seit 1966 hinzugekommenen Kläranlagen keinen meßbaren Einfluß erkennen. Allerdings kann die durch ihre Tätigkeit eingetretene Reduzierung der Nährsalze durch erhöhten diffusen Eintrag wieder wettgemacht worden sein. Die Phosphatkonzentration in der inneren Schlei (Abb. 4) hatte 1966 praktisch den gleichen Wert wie heute.



Inzwischen sind wohl die intensiven gewässerinternen Austauschprozesse zwischen dem Wasser und dem als großem Reservoir wirkenden Sediment diejenigen Vorgänge, die für die Konzentration der Nährsalze im Wasser in erster Linie maßgeblich sind.

Entsprechend den gleichbleibenden Nährstoffkonzentrationen hat sich auch die Algenmenge, wie sich anhand der Chlorophyll-Konzentration zeigt, wenig geändert, und damit einhergehend bewegt sich auch die Primärproduktivität auf dem gleichen Niveau wie 1972. Die Nährsalzkonzentration dürfte ihre Steuerfunktion für die Primärproduktion weitgehend verloren haben, da auch im Sommer noch eine genügende Menge zur Verfügung steht. Es ist wohl die Selbstbeschattung des Phytoplanktons, die verhindert, daß die Produktion noch weiter ansteigt. Die geringe Eindringtiefe des Lichtes zeigt sich an den kleinen Secchi-Tiefen von z. T. nur 40 cm. Eine deutliche Reduzierung der Nährsalzkonzentrationen würde sicherlich die Algendichte erniedrigen, nicht jedoch in gleichem Maße die Primärproduktivität pro Flächeneinheit, da bei geringer Algendichte auch in tieferen Schichten noch eine Photosynthese erfolgen kann.

Ganz anders sieht die Situation bei den mikrobiologischen Parametern aus. Hier ist bei der Saprophytenzahl ein Rückgang auf etwa ein Zehntel und bei der Gesamtcoliformenzahl auf etwa ein Viertel der früheren Werte festzustellen. Die Untersuchungen, die RHEINHEIMER 1966 in der Schlei durchführte sowie weitere Arbeiten aus belasteten Gewässern (RHEINHEIMER 1965 a, b) haben gezeigt, daß die höchsten Saprophytenzahlen in der Regel in den Wintermonaten und die niedrigsten im Sommer beobachtet wurden. Dieses läßt darauf schließen, daß diese an hohe Nährstoffkonzentrationen angepaßten Bakterien zu einem großen Teil allochthonen Ursprungs sind, d. h. also vom Land her in das Gewässer gelangen. Der naheliegende Schluß ist, daß dies besonders durch nicht oder nur unzureichend geklärte Abwässer geschieht. Unter der sicherlich vereinfachenden, aber trotzdem wohl weitgehend zutreffenden Annahme, daß der Anfall an Abwasser und damit der Eintrag der Saprophyten in das Gewässer keinen großen jahreszeitlichen Änderungen unterliegt, läßt ihr sommerlicher Rückgang vermuten, daß die Saprophyten in der warmen Jahreszeit relativ schnell eliminiert werden. Wahrscheinlich ist hierfür eine Kombination von erhöhter Absterberate durch die höheren Temperaturen und ein intensiveres Grazing durch bakterivore Organismen verantwortlich. Den Grazing-Druck können die Saprophyten, anders als die eigentlichen Gewässerbakterien, nicht wettmachen, denn infolge ihrer erhöhten Ansprüche an organische Nährstoffe, die selbst in einem so eutrophen Gewässer wie der Schlei kaum erfüllt werden, können sie sich im Gewässer selbst nur wenig vermehren.

Wenn sich also bei den neueren Untersuchungen gezeigt hat, daß die Saprophytenzahl jetzt erheblich niedriger ist als vor 25 Jahren und zudem ihr jahreszeitliches Maximum nicht mehr in den Winter sondern in den Sommer fällt, so läßt dies vermuten, daß der Saprophyteneintrag durch Abwasser keine große Rolle mehr spielt. Die jetzt gefundenen Saprophyten, deren Anteil an der Gesamtbakterienzahl nur noch ca. 1 ‰ gegenüber früher (schätzungsweise) 1 % beträgt, sind wahrscheinlich ein Teil der autochthonen Gewässerbakterienflora, deren Nährstoffanforde-

rungen zwar hoch, aber noch im Gewässer erfüllbar sind. Für die Zahl der Gesamtcoliformen gilt weitgehend das gleiche.

So hat die Abwasserreinigung zumindest hinsichtlich der Verringerung der Zahl der Saprophyten und der gesamtcoliformen Bakterien eine eindeutige Verbesserung der Situation zur Folge.

## Literatur

- GÖCKE, K. und G. RHEINHEIMER (1991): Influence of eutrophication on bacteria in two fjords of the Western Baltic. *Int. Revue ges. Hydrobiol.* 76, 371-385
- KIELER MEERESFORSCHUNGEN, Bd. 26, Heft 2 (1970): Chemische, mikrobiologische und planktologische Untersuchungen in der Schlei im Hinblick auf deren Abwasserbelastung
- KÖNIG, D. (1970): Landschaftlich-ökologische Fakten und Abwasserbelastung. In: Chemische, mikrobiologische und planktologische Untersuchungen in der Schlei im Hinblick auf deren Abwasserbelastung. *Kieler Meeresforsch.* 26: 111-119
- LENZ, J. (1970): Seston-, Chlorophyll- und Eiweißgehalt. In: Chemische, mikrobiologische und planktologische Untersuchungen in der Schlei im Hinblick auf deren Abwasserbelastung. *Kieler Meeresforsch.* 26: 180-192
- NELLEN, W. (1970): Hydrographie und Chemie. In: Chemische, mikrobiologische und planktologische Untersuchungen in der Schlei im Hinblick auf deren Abwasserbelastung. *Kieler Meeresforsch.* 26: 110-111
- REMANE, A. (1937): Die übrige Tierwelt. In: Neubauer, R. und S. Jaeckel: Die Schlei und ihre Fischereiwirtschaft, Teil III. *Schr. Nat. Ver. f. Schlesw.-Holst.* 22: 209-224
- RHEINHEIMER, G. (1965 a): Mikrobiologische Untersuchungen in der Elbe zwischen Schnackenburg und Cuxhaven. *Arch. Hydrobiol./Suppl. Elbe-Aestuar* 29: 181-251
- RHEINHEIMER, G. (1965 b): Der Einfluß der Temperatur auf das Bakterienleben in den Gewässern. *Naturwiss. Rundschau* 18: 476-481
- RHEINHEIMER, G. (1970 a): Bakterienverteilung. In: Chemische, mikrobiologische und planktologische Untersuchungen in der Schlei im Hinblick auf deren Abwasserbelastung. *Kieler Meeresforsch.* 26: 150-156

- RHEINHEIMER, G. (1970 b): Colizahlen. In: Chemische, mikrobiologische und planktologische Untersuchungen in der Schlei im Hinblick auf deren Abwasserbelastung. Kieler Meeresforsch. 26: 156-161
- RHEINHEIMER, G. (1970 c): Einfluß verschiedener Faktoren auf die Bakterienentwicklung. In: Chemische, mikrobiologische und planktologische Untersuchungen in der Schlei im Hinblick auf deren Abwasserbelastung. Kieler Meeresforsch. 26: 161-168
- RIPPL, W. (1986): Restaurierung der Schlei. Bericht über ein Forschungsvorhaben im Auftrag des Landesamts für Wasserhaushalt und Küsten Schleswig-Holstein, 86 S.
- SCHIEHMANN, S. (1974): Die Primärproduktion des Phytoplanktons der Schlei und des Windebyer Noors im Jahre 1972. (Ein Vergleich von Methoden und Biotopen). Dissertation Universität Kiel

## Diskussion

SCHLUNGBAUM: Sie haben die Situation in der Schlei dargestellt und dann die Vermutung ausgesprochen, daß es in den Darß-Zingster-Boddengewässern ähnlich sei. Wir haben in den letzteren einen wesentlich niedrigeren  $\text{PO}_4$ -Jahreswert von  $0.3-0.7 \mu\text{mol l}^{-1}$ , der in den einzelnen Boddern etwas unterschiedlich ist. Eine erhöhte Konzentration tritt nur auf, wenn Windstille herrscht, da dann die Sediment-Wasser-Wechselwirkungen zum Tragen kommen. Dann ist ein Vergleich mit der Schlei möglich, denn wir haben in der inneren Schlei einen durch die Ortslage windgeschützten Teil, also größtenteils eine Ruhigwassersituation, die wir in den Boddengewässern mit freiem Windzugang nicht haben. Da liegt der große Unterschied. In den Boddengewässern deutet sich das nur im Ribnitzer See an, im äußersten Teil also, der windgeschützt liegt als der andere Teil der Gewässer. Sonst wird durch Sediment-Wasser-Wechselwirkungen Phosphat ständig eliminiert, kann aber auch zurückgeführt werden.

Zur Frage der Sanierung. RIPL ist ja von seinem Projekt abgerückt. Ich habe jüngst viel mit ihm diskutiert, und ich bin nach wie vor im Gegensatz zu Ihnen der Meinung, man müsse beim Phosphat ansetzen, weil das steuerbar ist. Stickstoff kommt durch atmosphärischen Eintrag und das Stickstoffbindungsvermögen in das Gewässer, was aber bei manchen Gewässern verlorengegangen ist, weil genug Nitrat und Ammonium da sind. Wir haben uns jetzt in einem Arbeitskreis, der auch Beratungsgremium des Bundesumweltministeriums ist, dazu durchgerungen, Phosphat als Steuerelement, nicht als Limitationsfaktor, zu betrachten, wiewohl der Arbeitskreis der Meinung ist, auch in Küstengewässern sei Phosphat ein limitierendes Element. Momentan haben wir keine Nährstofflimitation, wir haben stattdessen eine Lichtlimitation, weil genügend Nährstoffe da sind.

MEYER-REIL: Die Experten, die hier diskutieren, sollten sehr deutlich sagen, was Phosphat eigentlich für ein solches Ökosystem bedeutet. Wo wird Phosphat unter welchen Bedingungen freigesetzt und was ist die Beziehung zwischen Stickstoffkomponenten einerseits und dem Phosphat als Grundlage für die Primärproduktion andererseits?

SCHLUNGBAUM: Für die Primärproduktion sind nach der Photosynthese Gleichung im wesentlichen Kohlenstoff und Wasser erforderlich. Wir wissen heute, daß wir die Synthese um Stickstoff und Phosphor und weitere Spurenstoffen erweitern müssen. Stickstoff und Phosphor werden im Prinzip im molaren Verhältnis 16:1 eingebaut, das ist das sogenannte Redfield-Verhältnis. Da also Phosphor 16mal weniger eingebaut wird als Stickstoff, ist mit weniger mehr zu steuern. Während bei der Synthese eine Sauerstofffreisetzung stattfindet, geschieht bei der Dissimilation, bei Abbauprozessen also, eine Sauerstoffzehrung und eine  $\text{CO}_2$ -Freisetzung. Dazu kommt eine Ammoniumfreisetzung, woraus per Nitrifikation sekundär Nitrat wird. Unter sauerstofffreien Bedingungen wird die Phosphatfreisetzung beschleunigt. Das heißt aber, daß unter solchen Bedingungen auch Abbauprozesse ablaufen. Wir können also über diese Nährstoffkreisläufe wesentliche Dinge zum biologischen Zyklus im Gewässer aussagen.

MEYER-REIL: Wir sollten dazu ganz eindeutig feststellen, daß diese Phosphatfreisetzung im Sediment auch schon dann passiert, wenn aerobe mit anaeroben Bedingungen wechseln. Phosphat, das z. B. durch die Bindung an Eisen festgelegt ist, wird zunächst im Sediment zu Eisen-III-Phosphat. Beim Abbau organischer Substanz durch verschiedene Elektronenakzeptoren, wie z. B. Sauerstoff und Nitrat, wird Eisen reduziert von  $\text{Fe}^{3+}$  zu  $\text{Fe}^{2+}$  und das Fatale ist, daß dann Phosphat und auch Spurenelemente freigesetzt werden. KÖSTER hat für Nordsee-Sediment sehr deutlich gezeigt, daß solche Wechsel in den Redoxverhältnissen mit der Freisetzung von Phosphat verbunden sind.

SCHLUNGBAUM: Wir haben dreiwertiges Eisen plus Phosphor. Es bildet sich Eisenphosphor, und das kann wieder rückläufig freigesetzt werden. Das gilt für jedes klare, tiefe Gewässer. In unserem Boddensystem liegt Eisen meistens als Oxihumat gebunden vor, das in Wechselwirkung mit dem Phosphat tritt, indem es dieses oberflächlich sorbiert. Dieses System ist nur noch bedingt redoxabhängig. Es ist ein Zyklus, bei SCHWOEBEL, 1984, beschrieben, der in Flachgewässern, die organisch bestimmt sind, abläuft: also nicht das klassische Redoxsystem klarer, tiefer Gewässer. Die organische Substanz ist also mitsteuerndes Element für den Trophiezustand.

HÖPNER: Ich formuliere etwas anders als Herr GÖCKE und Herr SCHLUNGBAUM, will also nicht Widerspruch anmelden.

Diese internen Phosphatkreisläufe sind also im wesentlichen steuernd, und möglicherweise gab es in den 60-iger Jahren schon genug Phosphat in den Sedimenten, so daß es offensichtlich nicht gelungen ist, den Zuwachs an diffusen Stickstoffeintrag auch aus der Atmosphäre durch Rücknahme per Kläranlagentechnik zu kom-



pensieren. 50 km<sup>2</sup> Wasserfläche ohne Einzugsgebiet nehmen größenordnungsmäßig 150 t N a<sup>-1</sup> aus der Atmosphäre auf, ausgehend von 30 kg ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>, was angeblich immer noch in einem geradezu exponentiellen Anstieg ist. Es wäre schon interessant, den Wert, der sich so ungefähr rückkalkulieren läßt für die 60-iger Jahre, in Beziehung zu setzen zu den damaligen Abwassereinträgen. Ist man dann nicht auf einem leider brisanten Stickstofflevel geblieben, von dem man, auch mit lokalen und regionalen Maßnahmen, unter keinen Umständen herunterkommen kann? Das gälte in dieser Art dann für alle Boddengewässer.

GÖCKE: Wir müßten diese Kalkulation noch machen, bisher ist das noch nicht geschehen.

SCHLUNGBAUM: Das, was Herr HÖPNER jetzt nannte, bedeutet für unsere flachen Gewässer bezüglich Stickstoff Eutrophie bis Polytrophy. Der Eintrag allein aus der Atmosphäre setzt also eine Grenze, jenseits derer wir momentan nicht steuern können. Deshalb hat HEYDEMANN (Umweltminister in Schleswig-Holstein) von seinem Ansatz, beim Stickstoff aufs Ganze zu gehen, heute doch etwas Abstand genommen. Denn nur in ganz großen Kläranlagen wird noch die Denitrifikation gefordert. HEYDEMANN wollte weitergehen bis zur Kläranlage Typ 1, 2 und 3, nicht 3, 4 und 5. Wenn wir das Modell auf Stickstoff erweitern und nicht bei Phosphor belassen, sehen wir bereits Eutrophie bis Polytrophy für diese Gewässer und das ist ostseetypisch.

N.N.: Noch ein kurzer Einwurf. Bei einer Präsentation des Projektes "Ökosystemforschung Wattenmeer" entstand helle Aufregung, verursacht durch ein schlichtes Tortendiagramm, aus dem hervorging, daß 3/4 des Stickstoffeintrages in das Wattenmeer, ohne Tidenwasserein- und -austrag wohlgemerkt, aus der Atmosphäre kamen. Es stellt sich also genau die Frage, die SCHLUNGBAUM eben angeschnitten hat: Hat es überhaupt noch einen Sinn, Kläranlageninvestition in Sachen Denitrifikation zu machen? Das ist tatsächlich ein ernstes Problem.

MEYER-REIL: Ich erinnere an den Artikel von HORSTMANN in "Die Zeit": "Ist die Ostsee ein Bauernopfer?", in dem ganz deutlich dieser Sachverhalt hergeleitet wird. Wenn ich mich recht erinnere, waren dort 75 % der Stickstoffkomponenten aus der Luft eingetragen angegeben, vor allem aus der Landwirtschaft.

Ich will auf einen anderen Aspekt aus dem Vortrag zurückkommen: Die wesentliche Produktionsquelle in den Bodden oder in der Schlei als Förde sei die Primärproduktion, die wiederum durch Einträge aus der Luft gespeist wird, aber sicherlich auch durch die Freisetzung der Nährstoffe aus dem Sediment. Und das ist ja ein Punkt, der vorher schon diskutiert wurde. In den Sedimenten liegt einer der Schlüssel zur Begrenzung der Produktionsprozesse begraben. Ich finde, das sollten wir festhalten.

DAHLKE: Das war doch aber auch der Ansatz von RIPL, nämlich durch Nitratzugabe die Nährstoffrückführung von Phosphat aus den Sedimenten zu verringern, d. h. durch Hebung des Redoxpotentials. Nun besteht für mich unabhängig davon,

welche Auswirkungen die Nitratzugabe auf die Primärproduktion hat, die Frage nach den Konsequenzen auf die Phosphatfreisetzung. In den Boddengewässern ist ein überwiegender Teil des Phosphats an organische Komplexe gebunden. Nach dem Ansatz von RIPL wird durch die Remineralisierung der Abbau des organischen Materials im Sediment beschleunigt. Logischerweise wäre die Konsequenz einer Nitratzugabe die Freisetzung von Phosphat, also genau das Gegenteil von dem, was man eigentlich mit der Nitratzugabe erreichen wollte.

SCHLUNGBAUM: Es ist tatsächlich so. Wenn das Phosphat von der organischen Substanz freigesetzt wird, steht es dem freigesetzten Eisen zur Verfügung. Eisenphosphat ist wieder löslich unter entsprechenden Redoxbedingungen, darum arbeitet RIPL ja auch mit Calcium. Bei ihm ist das Problem, daß ein punktförmiger Eintrag in der Schlei im Schlammgebiet vor Schleswig den Prozeß einer großflächigen Schlammreduktion nicht in Gang setzt, weil der Schlamm sich nicht bewegt. Die Nitratinjektion muß flächenverteilt stattfinden, aber auf keinen Fall großflächig und mit Anpassung der Nitratkonzentration an das Denitrifikationspotential des Schlammes, um zusätzlichen Nitratreintrag ins Gewässer aus dem Sediment zu vermeiden. Dazu haben wir ein Sedimentationsbecken-Programm vorgesehen; der aktive Schlamm wird gesammelt und dann entsprechend behandelt.

BOEDEKER: Ich will mal versuchen, die Konsequenzen daraus für mich abzuleiten. Wir sind in der Situation, in der wir offensichtlich nicht mehr in unserem eigenen Land mit unseren eigenen Methoden die Gewässerqualität beeinflussen können. Durch den Lufteintrag sind wir eingebunden in ein europaweites, ja weltweites System und müssen zur Lösung dieser Probleme auch diese Dimension sehen.

MEYER-REIL: Nur mit der Reduktion der Verunreinigungsquelle Landwirtschaft - Massentierhaltung und damit verbunden Güllewirtschaft - sinkt auch der Stickstoffeintrag durch die Luft, dessen wichtigste Komponente wohl Ammonium ist. Der Gedanke, daß demnach durch die Luft auch die Einträge der Nachbarn wirken, ist natürlich richtig.

N.N.: Die Transportstrecke für das Ammonium ist nicht so fürchterlich groß. Sie liegt je nach meteorologischen Bedingungen bei hundert oder wenigen hundert Kilometern, so daß man die Probleme an unseren Küsten durchaus durch Lösungsansätze in unserem Binnenland, vielleicht unter Einbeziehung von Holland, in den Griff bekommen könnte. Um aber denen, die sich noch nicht so intensiv damit beschäftigen konnten, Drastisches vorzuführen: eine Milchkuh in Normalhaltung, inklusive Gülle- und Düngereintrag, erzeugt soviel Stickstoff-Luftbelastung wie ein Pkw im Normalbetrieb. Diese macht das über Ammonium, jener über Stickoxide, und den Gewässern und Böden ist das gleich. In dem für norddeutsche Verhältnisse relativ industrialisierten Landkreis Westermarsch stehen nach unseren Berechnungen die Beiträge von Landwirtschaft und Industrie/Verkehr im Verhältnis von ungefähr 1:1.

SCHLUNGBAUM: Das kann man so für die Region Holland bis Mecklenburg in etwa übernehmen.

MÜLLER-MOTZFELD: Hier wird es ganz wichtig, Meßtechnik korrekt zu diskutieren. Ich sehe das ganz große Problem darin, daß wir von inkongruenten Erhebungen sprechen. Ich betone das. Aus Erhebungen, die das eine gemessen haben, schließen wir auf Rückkopplungsbeziehungen mit Werten aus einer anderen Zeitreihe, indem wir z. B. sagen, die Stickstoffbelastung, die war so und so hoch, z. B. 30 kg pro Hektar. Das wurde aber nicht zu der Zeit gemessen, als wir feststellten, daß unsere Bodden durch die Landwirtschaft beeinträchtigt werden. Dort brauchen wir gar nicht mehr zu hebeln, denn unsere Landwirtschaft geht ein, sie leitet fast gar nichts mehr ein. Wir kümmern uns um die Gewässer jetzt, aber für den Lufteintrag haben wir Werte, die vor fünf Jahren gemessen wurden. Gerade in der Boddenlandschaft müssen wir fordern; wirklich kongruente Erhebungen zu machen. Nicht nur die Meeresbiologen müssen untereinander ihre Erhebungen abstimmen, sondern sie müssen auch mit landseitigen abgestimmt sei. Das betrifft sowohl die Emissionswerte auf den Straßen als auch die wirklichen Düngereinträge der Landwirtschaft, diejenigen aus anderen Bereichen und schließlich die Austauschverhältnisse. Dieser komplexe Ansatz zwischen Land und Wasser fehlt. Daraus ergeben sich die Differenzen, die dann hinterher diskutiert werden.

MEYER-REIL: Das ist aber letzten Endes das, was Herr BOEDEKER auch meinte, daß man nämlich nicht nur an einer Stelle, in einem speziellen Bodden, sondern parallel auch an anderen Lokalitäten nachsieht und, wann immer möglich, zeitgleiche Untersuchungen durchführt. Dies ist wieder ein Punkt, den die Nationalparkverwaltung tatsächlich aufnehmen müßte, und zwar auf einer Ebene, die sie beeinflussen kann, indem sie auf gemeinsame Programme hinwirkt, mit dem Ziel kritischer paralleler und zeitgleicher Messungen, wie sie MÜLLER-MOTZFELD fordert. Ein Vergleich Land-Wasser liegt nahe. Diesen wichtigen Punkt sollten wir ganz deutlich festhalten.

SCHLUNGBAUM: Der letzte Statusbericht der Ostseekommission von 1985 nennt einen landseitigen Phosphoreintrag für die Ostsee von insgesamt 48.000 Tonnen pro Jahr. Auf Polen entfielen davon 40 %, auf die DDR 0,8 % und auf die Bundesrepublik ebenfalls sehr wenig. Diese Zahlen sind korrekt ohne diffuse Einträge. Sie sind nicht nur deshalb verständlich, weil Polen an den Hauptflüssen keine Kläranlagen hatte, sondern weil Bodden und Haffie vorgeschaltete Vorfluter sind, die mit ihrem biologischen Potential die Ostsee geschützt haben. Erst über den partikulären Austrag wurde dann die Ostsee belastet. An der polnischen Küste gibt es keine inneren Seegewässer, dort münden die Flüsse direkt in die Ostsee. Neben wissenschaftlichen Aspekten treten also unterschiedliche nationale und internationale politische Aspekte, die dann z. B. zum 10-Punkte-Programm des Bundesumweltministeriums führten. Doch bin ich der Meinung, daß wir zunächst unsere inneren Seegewässer retten müssen.

N.N.: Das heißt, daß jede Mark, die man in polnische Kläranlagen investiert, für die Ostsee viel mehr Wirkung hat, als wenn sie bei uns investiert würde.

BOEDEKER: Ich komme noch einmal auf die Bedeutung des atmosphärischen Stickstoffeintrags zurück. Für die Ostsee schätzt man, daß etwa 500.000 t aus direkter

und diffuser Einleitung kommen und weitere 500.000 t aus der Atmosphäre. Wie sicher sind diese Daten? Wird der atmosphärische Eintrag im Zuge des Ostsee-Monitoring-Programms an den Ostseestationen gemessen, oder wird er geschätzt? Es muß doch tatsächlich ein weiterer Transport über den regionalen Bereich hinaus vorhanden sein.

SCHLUNGBAUM: Ja, der Eintrag wird auf ausgewählten Schiffsstationen in der Ostsee gemessen. Es ist tatsächlich so, daß rund  $10^6$  t  $a^{-1}$  zu 50 % aus der Atmosphäre und zu 50 % vom Lande kommen, wobei diffuse und punktuelle Einleiter zusammenfließen. Beim Phosphor kommt prinzipiell ein ganz geringer Teil aus der Atmosphäre, obwohl die Trockendeposition heute einen bemerkenswerten Anteil stellt. Wir dürfen nicht nur über Niederschläge reden. NAUSCH hat festgestellt, daß in unserem Gebiet die Trockendeposition von Ammoniak-Stickstoff aus der Atmosphäre enorm ist. Eine Bilanz liegt noch nicht vor. Ich unterstütze HÖPNER voll und ganz. Der Eintrag bestimmter Stickstoffformen hat verstärkt regionalen Aspekt, so daß wir bei der Landwirtschaft tatsächlich regulieren können.

DAHLKE: Vielleicht ist es in der Atmosphäre unter Berücksichtigung der Meteorologie einfacher als im Wasser oder gar in Sedimenten, solche Modelle zu machen. Ich möchte daran erinnern, daß im atmosphärischen Stickstoffeintrag in die Ostsee auch der Stickstoff aus der biologischen Stickstofffixierung enthalten ist, und der unterliegt starken jährlichen Schwankungen. Daneben kommt es durch die Wasserbewegung zum Zusammentreiben, zur Konzentration von Algen, die auch wieder weit auseinanderdriften. Es entstehen aber auch Probleme, wenn Messungen im Millimeter- oder Millilitermaßstab dann auf Kubikkilometer Ostseewasser hochgerechnet werden.

SCHLUNGBAUM: Für den Zingst werden täglich Strömungsdaten ermittelt, die Strömungsverhältnisse in und aus Richtung Ostsee sind bekannt. Das sagt nicht viel über die Ostseebelastung aus, weil ein Großteil des Wasserkörpers nur pendelt und dabei mit biologischen Veränderungen am selben Meßpunkt immer wieder erscheint. In Flußmündungsgebieten, wie an der Recknitz oder der Barthe, müßte am Ostseeausgang gemessen werden, aber auch da wird es schwierig, weil am Ausgang der Boddenkette am Südteil des Gellen, ein Dreifach-Strömungssystem herrscht. Es setzt Einstrom von der Ostsee Richtung Strelasund mit eventueller Abzweigung in die Boddenkette oder Ausstrom aus der Boddenkette in den Strelasund ein, nicht gen Ostsee. Es erhebt sich die Frage, wo wir nun wirklich die Belastung des Systems messen können.